

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2022

Read
online

Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Неведомая Е.Н.,
Тер-Мисакянц Т.А., Казеев К.Ш.

Подходы к разработке экологических региональных нормативов содержания свинца в почвах Черноморского побережья Кавказа на основе интегрального показателя биологического состояния почвы

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия

Введение. Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) – активно развивающийся регион с растущей инфраструктурой туризма и отдыха. Здесь расположены редкие и уникальные почвы, такие как чернозёмы южные (каштановые), коричневые почвы сухих субтропиков, желтозёмы. Свинец (Pb) входит в приоритетную группу тяжёлых металлов-токсикантов для почвы. Однако использование единых, общих нормативов содержания Pb во всех типах почв нецелесообразно, поскольку при их расчёте не учитываются местные региональные эколого-геохимические особенности почв.

Материалы и методы. Для установления значений региональных предельно допустимых концентраций (рПДК) Pb в почвах ЧПК моделировали их загрязнение и определяли степень ухудшения биологического состояния. Почвы подвергали загрязнению из расчёта 100; 1000; 10 000 мг Pb на 1 кг почвы, что соответствует 1; 10 и 100 ПДК этого элемента по стандартам Германии и ряда других стран. Через 30 сут оценивали изменение биологических параметров (численность почвенных бактерий, активность ферментов, длина корней редиса). Для удобства интерпретации полученных результатов значения нескольких исследованных биологических показателей, имеющих разные единицы измерения, объединяли, получая интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы.

Результаты. В большинстве случаев наблюдалось угнетение биологических свойств исследуемых почв. По устойчивости к загрязнению Pb почвы ЧПК образуют следующий ряд: чернозём южный (85) > коричневая типичная (79) > дерново-карбонатная типичная (77) > коричневая выщелоченная (76) > коричневая карбонатная (74) = дерново-карбонатная выщелоченная (74) = желтозём (74) > бурая лесная слабонасыщенная (67) > бурая лесная кислая (65) > бурая лесная кислая оподзоленная (59). На основании анализа снижения экологических функций почв установлены рПДК Pb в почвах ЧПК. Региональные значения ПДК Pb в чернозёме южном составляет 120 мг/кг, в коричневой типичной, коричневой выщелоченной, коричневой карбонатной, дерново-карбонатной выщелоченной, дерново-карбонатной типичной, желтозёме – 100 мг/кг, в бурой лесной кислой, бурой лесной слабонасыщенной – 70 мг/кг, в бурой лесной кислой оподзоленной – 65 мг/кг.

Ограничения исследования. Предложенные рПДК Pb в почвах применимы прежде всего на территории ЧПК.

Заключение. Предложенные рПДК Pb в почвах ЧПК могут быть использованы природоохранными, сельскохозяйственными и научными организациями.

Ключевые слова: почва; загрязнение; свинец; устойчивость почв; региональные предельно допустимые концентрации; Черноморское побережье Кавказа

Соблюдение этических стандартов: исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Неведомая Е.Н., Тер-Мисакянц Т.А., Казеев К.Ш. Подходы к разработке экологических региональных нормативов содержания свинца в почвах Черноморского побережья Кавказа на основе интегрального показателя биологического состояния почвы. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(3): 262–269. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-262-269>

Для корреспонденции: Кузина Анна Андреевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону. E-mail: nyuta_1990@mail.ru

Участие авторов: Кузина А.А. – сбор данных литературы, написание текста, редактирование; Колесников С.И. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Минникова Т.В. – сбор материала и обработка данных, редактирование; Неведомая Е.Н., Тер-Мисакянц Т.А. – сбор материала и обработка данных, статистическая обработка данных; Казеев К.Ш. – сбор материала и обработка данных, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование осуществлялось в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ 0852-2020-0029), по государственной программе поддержки молодых российских учёных кандидатов наук и ведущих научных школ Российской Федерации (гранты Президента РФ МК-2688.2022.1.5 и НШ-449.2022.5).

Поступила: 17.09.2021 / Принята к печати: 25.11.2021 / Опубликована: 08.04.2022

Anna A. Kuzina, Sergey I. Kolesnikov, Tatiana V. Minnikova, Elena N. Nevedomaya,
Tigran A. Ter-Misakyants, Kamil Sh. Kazeev

Approaches to the development of environmental regional standards for the content of lead in the soils of the Black Sea coast of the Caucasus on the basis of an integral indicator of the biological state of the soil

Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation

Introduction. The Black Sea coast of the Caucasus is an actively developing region with a progressively growing tourism and recreation infrastructure. However, there are rare and unique soils, such as southern chernozems (chestnut), brown soils of dry subtropics, yellow soils.

Lead (Pb) is a priority group of toxicant metals. However, the use of uniform, common standards of Pb content in all types of soils is impractical, since local regional ecological and geochemical features of soils are not taken into account when calculating them.

Materials and methods. Soil contamination of 100, 1000, 10,000 mg Pb per 1 kg of soil was modelling, corresponding to 1, 10 and 100 MPC of this element in Germany and several other countries. After 30 days, changes in biological parameters (the number of bacteria, the activity of soil enzymes and length of roots

of radish) were evaluated. To combine the values of the studied biological indicators with different units of measurement into one common indicator, an integral indicator of the biological state (IIBS) of the soil was used.

Results. In most cases, there was an inhibition of the biological properties of the studied soils. According to the resistance to Pb pollution, the soils of the Black Sea coast of the Caucasus form the series including southern chernozems (Haplic Chernozems Pachic) (85) > cinnamonic typical (Haplicisols Eutric) (79) > soddy-carbonate typical (Rendzic Leptosols Eutric) (77) > cinnamonic leached (Haplic Cambisols Eutric) (76) > cinnamonic carbonate (Haplic Cambisols Eutric) (74) = sod-calcareous leached (Rendzic Leptosols Eutric) (74) = yellow soils (Albic Luvisols Abruptic) (74) > brown forest weakly-unsaturated (Haplic Cambisols Eutric) (67) > brown forest acid (Haplic Cambisols Eutric) (65) > brown forest acid podzolized (Haplic Cambisols Dystric) (59).

On the base of the analysis of the degree of failure of environmental functions of soils, regional values of maximum permissible concentrations (rMPC) of Pb in soils of the Black Sea coast of the Caucasus are established. Regional values of maximum permissible concentrations of Pb for southern chernozem is 120 mg/kg, for cinnamonic typical, cinnamonic leached, cinnamonic carbonate, sod-calcareous leached, sod-calcareous typical soils and yellow soil — 100 mg/kg, for brown forest acid, brown forest weakly-unsaturated — 70 mg/kg, 65 mg/kg for brown forest acid podzolized.

Limitations. The proposed maximum permissible concentrations of Pb in soils are applicable primarily to the territory of the Black Sea coast of the Caucasus.

Conclusion. The proposed maximum permissible concentrations of Pb in the soils of the Black Sea coast of the Caucasus can be used by environmental, agricultural and scientific institutions.

Keywords: soil; pollution; lead; stability; regional maximum permissible concentrations; Black Sea coast of the Caucasus

Compliance with ethical standards. The study does not require an opinion from a biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Nevedomaya E.N., Ter-Misakyan T.A., Kazeev K.Sh. Regional standards of lead content in soils of the Black Sea coast of the Caucasus. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2022; 101(3): 262–269. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-262-269> (In Russian)

For correspondence: Anna A. Kuzina, MD, PhD. Senior researcher of the Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology. D.I. Ivanovsky Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. E-mail: nyuta_1990@mail.ru

Information about the authors:

Kuzina A.A., <https://orcid.org/0000-0001-8816-5288> Kolesnikov S.I., <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>
Minnikova T.V., <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137> Nevedomaya E.N., <https://orcid.org/0000-0003-1194-0770>
Ter-Misakyan T.A., <https://orcid.org/0000-0002-3592-3118> Kazeev K.Sh., <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>

Contribution: Kuzina A.A. — collection of literature data, text writing, editing; Kolesnikov S.I. — research concept and design, text writing, editing; Minnikova T.V. — collection of material and data processing, editing; Nevedomaya E.N., Ter-Misakyan T.A. — collection of material and data processing, statistical data processing; Kazeev K.Sh. — collection of material and data processing, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgment. The research was carried out within the framework of the state assignment in the field of scientific activity (No. 0852-2020-0029), under the state program of support for young Russian scientists — candidates of sciences and leading scientific schools of the Russian Federation (grants of the President of the Russian Federation MK-2688.2022.1.5 and NSH-449.2022.5).

Received: September 17, 2021 / Accepted: November 25, 2021 / Published: April 08, 2022

Введение

Свинец (Pb) как химический элемент широко распространён в природе. Чаще всего источником его поступления в окружающую среду является антропогенная деятельность: применение свинецсодержащих красок, выбросы промышленных предприятий, сжигание мусора, использование этилированного бензина и т. д. [1–4]. Свинец входит в приоритетную группу металлов-токсикантов¹. Высокие концентрации Pb в окружающей среде оказывают отрицательное воздействие как на микроорганизмы [5, 6] и растения [7, 8], так и на здоровье человека [9, 10]. Установлено, что Pb может проявлять канцерогенные и генотоксические свойства [1].

ПДК для Pb, установленная в Российской Федерации, распространяется на все почвы, расположенные на территории нашей страны². Однако использование единых, общих нормативов содержания Pb для разных типов почв недопустимо [11]. Поэтому необходима разработка региональных и/или локальных ПДК загрязняющих веществ, при расчёте которых будут учитываться местные региональные особенности почв.

Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) — активно развивающийся регион с растущей инфраструктурой туризма и отдыха. В то же время на территории ЧПК расположены заповедные и природоохранные зоны с очень разнообразной, уникальной для России и мира природой, весьма чувствительной к антропогенным воздействиям. Такие редкие почвы, как чернозёмы южные (каштановые), коричневые почвы сухих субтропиков, желтозёмы, расположены на территории Причерноморья [12, 13].

¹ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.

² Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».

Цель работы — установить значения региональных ПДК свинца в почвах ЧПК по изменениям биологических параметров почв.

Материалы и методы

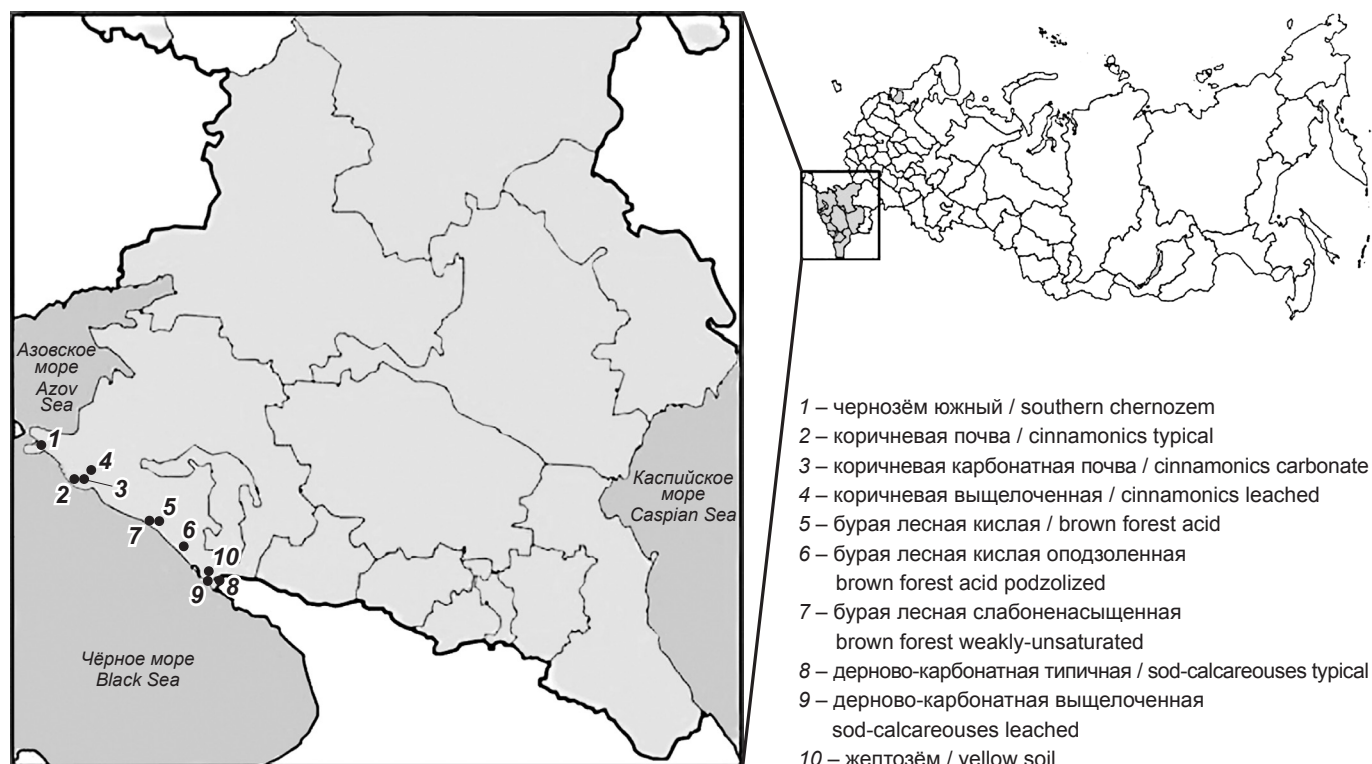
Объектами исследований являлись почвы сухих и влажных субтропиков ЧПК. Названия, места отбора, характеристики почв представлены в табл. 1 и на рис. 1. Как видно из таблицы, почвы ЧПК различаются по своим эколого-генетическим свойствам [12, 13], следовательно, можно предположить, что существуют различия и по устойчивости к загрязнению свинцом, и по предельно допустимым количествам Pb в почве.

Загрязнение почв моделировали в лабораторных условиях. Загрязняли верхние 10 см почвы, поскольку основное загрязнение тяжёлыми металлами (ТМ) приходится на этот слой [14].

При выборе химической формы ТМ остановились на оксиде свинца (PbO), поскольку основная масса ТМ поступает в почву в этой форме [14], а также для исключения воздействия сопутствующих анионов, которые присутствуют в солях металлов. Изучали влияние 100; 1000; 10 000 мг Pb на 1 кг почвы, что соответствует 1; 10 и 100 ПДК этого элемента по стандартам Германии [15].

Выбор значений обусловлен тем, что фоновое содержание Pb в большинстве почв Юга России, в том числе на территории ЧПК, превышает установленную в России ПДК (32 мг/кг). При внесении в исследуемые почвы ЧПК 100 мг/кг Pb дополнительно к его фоновому содержанию [16] даёт итоговую концентрацию свинца в почве, равную 3–4 фоновым значениям. Как было показано ранее [11, 17], многие ТМ начинают проявлять негативный токсический эффект как раз при достижении концентрации, равной 3–4 фоновым.

Образцы почв массой 500 г подвергали загрязнению Pb, затем тщательно перемешивали. В дальнейшем образцы загрязнённой почвы инкубировали на протяжении 30 дней



№	Тип почвы Soil type	Условные обозначения Symbols	Гранулометрический состав Granulometric composition	Содержание органического вещества (C _{орг}), % Content of organic matter, %	pH
1	Чернозём южный / Southern chernozem	Чю	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	3.2	7.7
2	Коричневая типичная / Cinnamomics typical	К(т)	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	9.3	7.2
3	Коричневая карбонатная / Cinnamomics carbonate	К(к)	Среднесуглинистая / Medium loamy	15.0	7.0
4	Коричневая выщелоченная / Cinnamomics leached	К(в)	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	6.8	7.1
5	Буря лесная кислая / Brown forest acid	Бл	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	1.3	4.4
6	Буря лесная кислая оподзоленная / Brown forest acid podzolized	Бл(оп)	Легкосуглинистая / Light loamy	1.7	4.1
7	Буря лесная слабонасыщенная / Brown forest weakly-unsaturated	Бл(н)	Суглинистая / Loam	1.9	5.1
8	Дерново-карбонатная типичная / Sod-calcareous typical	Дк(т)	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	5.4	7.5
9	Дерново-карбонатная выщелоченная / Sod-calcareous leached	Дк(в)	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	4.8	6.9
10	Желтозём / Yellow soil	Ж	Тяжелосуглинистая / Heavy loamy	3.2	5.2

Рис. 1. Карта-схема отбора почв Черноморского побережья Кавказа.

Fig. 1. Schematic map of soil sampling sites on the Black Sea coast of the Caucasus.

в пластиковых сосудах при температуре 20–22 °С и при 55–60% влажности почвы.

Поскольку биологические показатели являются наиболее чувствительными и информативными [17], для оценки экологических последствий загрязнения почв ТМ наиболее целесообразно применять методы биоиндикации и биотестирования: микробиологические показатели (общая численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*), ферментативную активность (активность каталазы и дегидрогеназ, целлюлозолитическая активность), фитотоксические показатели (длина корней редиса).

Вышеуказанные показатели определены согласно общепринятым методам биодиагностики и биотестирования почв [19, 20]. Общую численность бактерий в почве учитывали с помощью прямой люминесцентной микроскопии с учётом количества почвенных бактерий после окрашивания акридиновым оранжевым красителем по Д.Г. Звягинцеву и П.А. Кожевину. Обилие бактерий рода *Azotobacter* учитывали методом комочков обрастания на среде Эшби по методике Н.А. Красильникова. Среду разливали в чашки Петри и помещали в них комки увлажнённой почвы (25 штук на 1 чашку, температура инкубации плюс 22–25 °С). Эти опе-

рации выполнялись в ламинарном боксе. Количество комочков обрастания подсчитывали через 14 дней после начала эксперимента. Активность каталазы определяли по методу А.Ш. Галстяна, оценивая объём кислорода, высвободившегося после разложения H₂O₂ при контакте с исследуемой почвой. Активность дегидрогеназ определяли методом восстановления хлорида трифенилтетразолия в трифенилформазан по методике А.Ш. Галстяна в модификации Ф.Х. Хазиева. По степени разложения хлопчатобумажного полотна оценивали целлюлозолитическую активность. Оценку фитотоксических свойств почвы проводили по интенсивности начального роста проростков редиса (длина корней). Семена редиса проращивали на почве в чашках Петри (25 семян на чашку Петри) в течение 7 сут, после чего измеряли длину корней (ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести).

По микробиологическим, биохимическим и фитотоксическим параметрам вычисляли ИПБС – интегральный показатель биологического состояния почвы [17]. Этот показатель позволяет комплексно оценить экологическое состояние почв, поскольку включает в себя ряд её микробиологических, биохимических и фитотоксических параметров.

Таблица 1 / Table 1

Основные биологические показатели почв
The main biological indices of soils

№	Тип почвы Soil type	Классификация по WRB (2015) [18] The name of the soil WRB (2015) [18]	Численность бактерий, млрд/г Number of bacteria, billion/g	Активность каталазы, мл O ₂ /г/мин Activity catalase, ml O ₂ /g/mine	Активность дегидрогеназ, мг ТФФ/г/24 ч Dehydrogenase activity, mg TFF/g/ 24 h	Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , % обрастания Abundance of bacteria of the genus <i>Azotobacter</i> , % fouling
1	Чернозём южный Southern chernozem	Чернозёмы гаплические паховые Haplic Chernozems Pachic	4.2	7.3	16.5	100
2	Коричневая типичная Cinnamomics typical	Камбизолы гаплические эвтрические Haplic Cambisols Eutric	4.2	16.5	9.0	67
3	Коричневая карбонатная Cinnamomics carbonate	Камбизолы гаплические эвтрические Haplic Cambisols Eutric	3.7	11.9	8.7	66
4	Коричневая выщелоченная Cinnamomics leached	Камбизолы гаплические эвтрические Haplic Cambisols Eutric	3.4	8.7	7.3	63
5	Буряя лесная кислая Brown forest acid	Камбизолы гаплические эвтрические Haplic Cambisols Eutric	2.9	1.8	5.0	56
6	Буряя лесная кислая оподзоленная Brown forest acid podzolized	Камбизолы гаплические дистрические Haplic Cambisols Dystric	2.5	2.9	3.7	57
7	Буряя лесная слабоненасыщенная Brown forest weakly-unsaturated	Камбизолы гаплические эвтрические Haplic Cambisols Eutric	2.7	5.8	6.7	96
8	Дерново-карбонатная типичная Sod-calcareouses typical	Рендзические лептосолы эвтрические Rendzic Leptosols Eutric	2.5	4.3	6.3	61
9	Дерново-карбонатная выщелоченная Sod-calcareouses leached	Рендзические лептосолы эвтрические Rendzic Leptosols Eutric	2.3	2.6	6.9	61
10	Желтозём Yellow soil	Альбик Лувизолы Резкие Albic Luvisols Abruptic	3.5	6.4	14.5	67

Для вычисления ИПБС за 100% принимали контрольные (незагрязнённые) значения каждого определяемого биологического параметра, и по отношению к нему находили процентное значение показателя уже в почве с внесённым загрязнением. Далее рассчитывали ИПБС по формуле 1:

$$\text{ИПБС} = (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n) / N, \quad (1)$$

где V_1, V_2, V_3, V_n – процентное значение для каждого биологического параметра; N – число показателей.

Для того чтобы оценить достоверность различий между вариантами исследования, проведён дисперсионный анализ с дальнейшим определением наименьшей существенной разности (НСР). Корреляционный анализ данных использовали для оценки информативности разных биологических параметров почв, регрессионный анализ – для определения значений ПДК свинца в почве. При обработке результатов использовали программный пакет для статистического анализа Statistica 12.0 и программу Excel 2020 (Microsoft, США).

Результаты

Внесение Pb в почвы в большинстве случаев негативно отразилось на исследуемых показателях биологического состояния (рис. 2).

Зафиксировано достоверное снижение ферментативной активности, численности микроорганизмов и роста растений, спад целлюлозолитической активности. Однако при внесении 1 ПДК Pb наблюдали эффект гормезиса при определении активности каталазы для следующих почв: чернозём южный (увеличение на 3%), коричневая выщелоченная

(увеличение на 2%), дерново-карбонатная типичная (увеличение на 11%). Для дерново-карбонатной выщелоченной эффект гормезиса зафиксирован и при внесении 10 ПДК Pb (увеличение на 6%). При определении активности дегидрогеназ отмечалось стимулирование при внесении 1 ПДК Pb в дерново-карбонатной типичной почве на 8% (см. рис. 2).

По устойчивости к загрязнению Pb почвы ЧПК образуют следующий ряд: чернозём южный (85) > коричневая типичная (79) > дерново-карбонатная типичная (77) > коричневая выщелоченная (76) > коричневая карбонатная (74) = дерново-карбонатная выщелоченная (74) = желтозём (74) > буряя лесная слабоненасыщенная (67) > буряя лесная кислая (65) > буряя лесная кислая оподзоленная (59). Значения ИПБС, приведённые в скобках, представляют среднее для трёх концентраций (1; 10 и 100 ПДК) и выражаются в процентах относительно незагрязнённой почвы (контроля), принятой за 100%. Чем меньше снижаются значения ИПБС почв (указаны в скобках) относительно незагрязнённой почвы – контроля (100%), тем устойчивее почва к загрязнению свинцом.

Обсуждение

Устойчивость почв ЧПК к загрязнению Pb зависела от таких свойств, как гранулометрический состав, щелочно-кислотные условия и содержание органического вещества (см. рис. 1). По степени изменения ИПБС самыми устойчивыми к загрязнению свинцом проявили себя чернозёмы южные (для этих почв характерен тяжёлый гранулометрический состав, pH = 7,7 и содержание органического вещества 3,2%),

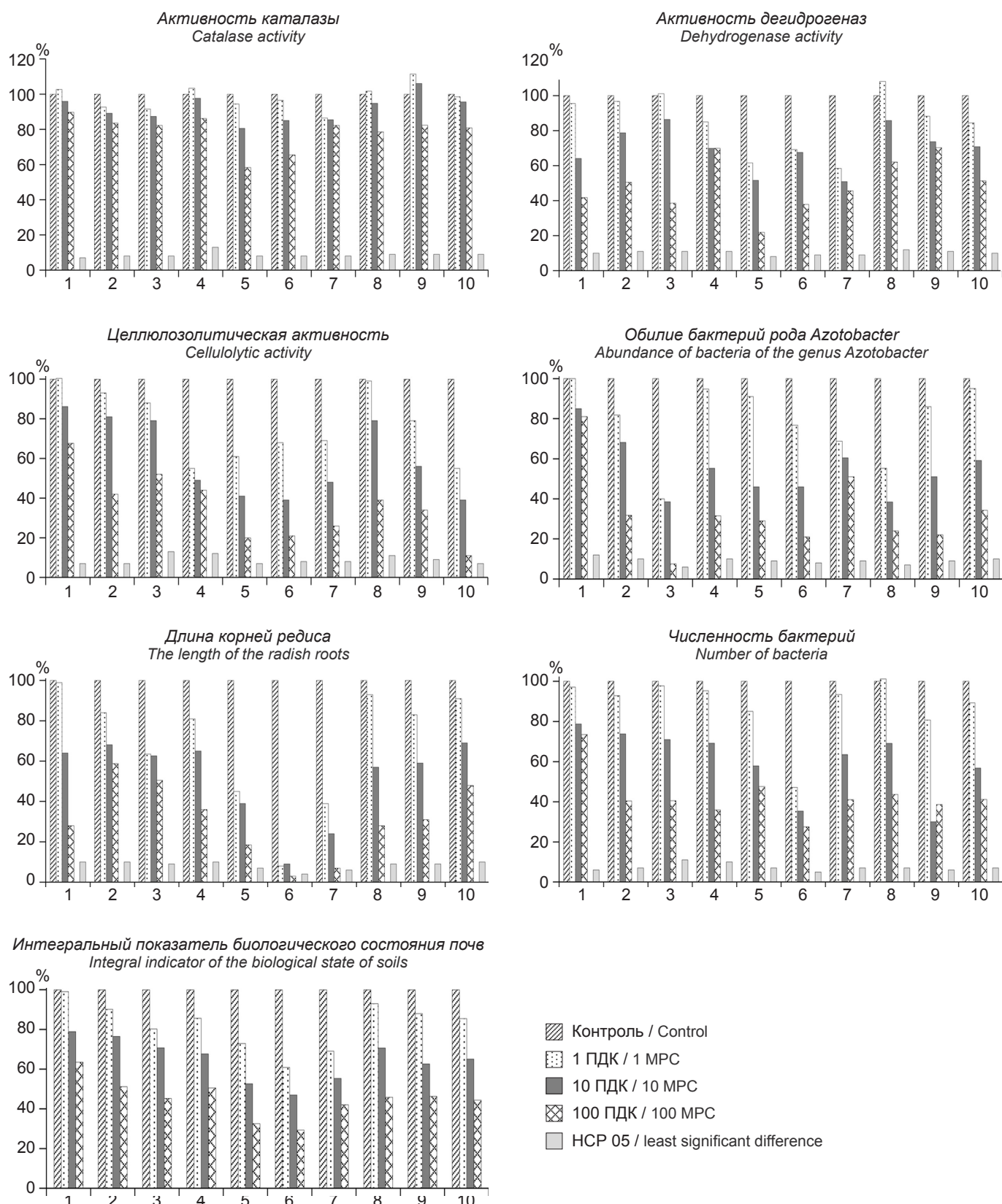


Рис. 2. Изменение показателей биологического состояния почв Черноморского побережья Кавказа при загрязнении свинцом, % от контроля. 1 – чернозём южный; 2 – коричневая типичная; 3 – коричневая карбонатная; 4 – коричневая выщелоченная; 5 – бурая лесная кислая; 6 – бурая лесная кислая оподзоленная; 7 – бурая лесная слабоненасыщенная; 8 – дерново-карбонатная типичная; 9 – дерново-карбонатная выщелоченная; 10 – желтозём.

Fig. 2. Changes in the biological indices of soils on the Black Sea coast of the Caucasus with lead contamination, % of control. 1 – southern chernozem; 2 – cinnamonics typical; 3 – cinnamonics carbonate; 4 – cinnamonics leached; 5 – brown forest acid; 6 – brown forest acid podzolized; 7 – brown forest weakly-unsaturated; 8 – sod-calcareous typical; 9 – sod-calcareous leached; 10 – yellow soil.

Таблица 2 / Table 2

Нормативы содержания свинца в почвах
Standards of lead content in soils

Тип почвы Soil type	Нарушение функций* Degraded ecological functions of soil*			
	не нарушены Functions are not broken	информационные Informative	химические, физико-химические, биохимические; целостные Chemical, physico-chemical, biochemical; holistic	физические Physical
	< 5%	5–10%	10–25%	> 25%
Концентрация свинца в почве, мг/кг The concentration of lead in the soil, mg/kg				
Чернозём южный / Southern chernozem	< 60	60–120	120–350	> 350
Коричневая типичная / Cinnamomics typical	< 55	55–100	100–300	> 300
Коричневая выщелоченная / Cinnamomics leached	< 50	50–100	100–250	> 250
Коричневая карбонатная / Cinnamomics carbonate	< 50	50–100	100–250	> 250
Буряя лесная кислая / Brown forest acid	< 50	50–70	70–200	> 200
Буряя лесная кислая оподзоленная / Brown forest acid podzolized	< 40	40–65	65–170	> 170
Буряя лесная слабоненасыщенная / Brown forest weakly-unsaturated	< 50	50–70	70–220	> 220
Дерново-карбонатная типичная / Sod-calcareous typical	< 60	60–100	100–250	> 250
Дерново-карбонатная выщелоченная / Sod-calcareous leached	< 50	50–100	100–250	> 250
Желтозём / Yellow soil	< 50	50–100	100–220	> 220

Примечание. * – классификация экосистемных функций почвы по [21]; ** – ИПБС почв определены по [17].

Note. * – classification of ecosystem functions of the soil according to [21]; ** – integral indicators of the biological state of the soil of soils are determined according to [17].

а меньшую устойчивость показали бурые лесные оподзоленные почвы (с легкосуглинистым гранулометрическим составом, рН = 4,1 и содержанием органического вещества 1,7%). Наибольшая устойчивость чернозёмов обусловлена нейтральной реакцией среды и, следовательно, меньшей подвижностью ТМ в почве и меньшим их влиянием на исследованные биологические показатели.

Высокая устойчивость коричневых и дерново-карбонатных почв определяется большим содержанием в них органического вещества и близкой к нейтральной реакцией среды (см. рис. 1). В то же время необходимо отметить, что различия в устойчивости дерново-карбонатных, коричневых почв и желтозёмов довольно незначительны по сравнению, например, с чернозёмами, имеющими гораздо более высокую устойчивость к загрязнению ТМ.

Проведённое исследование позволило рассчитать рПДК Рв в почвах ЧПК. На основе уравнений регрессии, отражающих связь между ИПБС почвы и концентрацией в ней свинца, для каждой из почв просчитаны концентрации Рв, при внесении которых наблюдается сбой экологических функций (табл. 2). О нарушении той или иной группы экологических функций почвы свидетельствует степень снижения ИПБС на 5; 10 или 25%. [11, 17].

В качестве рПДК следует принимать концентрацию металла, вызывающую нарушение целостных экологических функций почвы, определяющих её важнейшие свойства, в том числе плодородие. Соответственно, как видно из табл. 2, рПДК Рв в чернозёме южном составляет 120 мг/кг; в коричневой типичной, коричневой выщелоченной, коричневой карбонатной, дерново-карбонатной выщелоченной,

дерново-карбонатной типичной, желтозёме – 100 мг/кг; в бурой лесной кислой, бурой лесной слабоненасыщенной – 70 мг/кг; в бурой лесной кислой оподзоленной – 65 мг/кг. Следует отметить, что предложенные рПДК Рв в почвах применимы прежде всего на территории ЧПК, где они могут быть использованы природоохранными, сельскохозяйственными и научными организациями.

Результаты исследования подтверждают установленные ранее закономерности негативного влияния загрязнения свинцом на биологические параметры почв [22], а также зависимость устойчивости почв от их физико-химических и биохимических параметров [23, 24].

Ранее при изучении чернозёмов Юга России было установлено [25, 26], что высокие концентрации органического вещества в большей степени обеспечивают буферность почвы к загрязнению хромом, а высокие значения рН больше определяют устойчивость почвы к меди, никелю и свинцу. Исследование почв Черноморского побережья в целом подтвердило эту закономерность.

Целесообразно продолжить исследование устойчивости почв ЧПК к приоритетным для этой территории поллютантам, таким как различные тяжёлые металлы, нефть и нефтепродукты, пестициды, антибиотики. Актуально исследовать широкий спектр концентраций загрязняющих веществ с целью более точного определения пределов устойчивости почв, а также изучить процесс изменения биологических показателей в динамике при разных сроках экспозиции загрязнения (от 3 до 365 сут). Важно также продолжить поиск наиболее чувствительных и информативных биологических показателей состояния почвы.

Заключение

1. Загрязнение Pb почв ЧПК, как правило, вызывает негативные изменения биологических показателей.

2. По устойчивости к загрязнению Pb почвы ЧПК образуют следующий ряд (по степени изменения ИПБС): чернозём южный (85) > коричневая типичная (79) ≥ дерново-карбонатная типичная (77) ≥ коричневая выщелоченная (76) ≥ коричневая карбонатная (74) = дерново-карбонатная выщелоченная (74) = желтозём (74) > бурая лесная слабонасыщенная (67) ≥ бурая лесная кислая (65) > бурая лесная кислая оподзоленная (59).

3. В данном исследовании самыми устойчивыми к загрязнению свинцом проявили себя чернозёмы южные, а наименьшую устойчивость показали бурые лесные оподзоленные почвы.

4. Выявленная закономерность устойчивости почв к загрязнению Pb определяется прежде всего такими свойствами почв, как содержание органического вещества, реакция среды и гранулометрический состав.

5. Установлены региональные значения рПДК Pb в почвах ЧПК по изменениям их биологического состояния. Значение рПДК Pb в чернозёме южном составляет 120 мг/кг; в коричневой типичной, коричневой выщелоченной, коричневой карбонатной, дерново-карбонатной выщелоченной, дерново-карбонатной типичной, желтозёме – 100 мг/кг; в бурой лесной кислой, бурой лесной слабонасыщенной – 70 мг/кг; в бурой лесной кислой оподзоленной – 65 мг/кг.

6. Предложенные рПДК Pb в почвах применимы прежде всего на территории ЧПК, где они могут быть использованы природоохранными, сельскохозяйственными и научными организациями.

Литература

(п.п. 2–9, 14, 15, 17, 18, 23, 24 см. References)

1. Теплая А.Г. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы). *Астраханский вестник экологического образования*. 2013; (1): 182–96.
10. Сульдина Т.И. Содержание тяжелых металлов в продуктах питания и их влияние на организм. *Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы*. 2016; (1): 136–40.
11. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжёлыми металлами. *Почвоведение*. 2002; (12): 1509–14.
12. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. *Почвы Юга России*. Ростов-на-Дону: Эверест; 2008.
13. Казеев К.Ш., Колесников С.И. *Атлас почв Азово-Черноморского бассейна*. Ростов-на-Дону; 2015.
16. Алексеев В.А., Суворинов А.В., Власова Е.В. *Металлы в окружающей среде. Прибрежные аквальные ландшафты Черноморского побережья России*. М.; 2012.
19. Звягинцев Д.Г., ред. *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. М.; 1991.
20. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. *Методы биодиагностики наземных экосистем*. Ростов-на-Дону; 2016.
21. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. *Экология почв. Учение об экологических функциях почв*. М.: Наука; 2006.
22. Мошенко Д.И., Кузина А.А., Колесников С.И. Сравнительная оценка устойчивости черноземов Центрального Предкавказья и Кавказа к загрязнению свинцом, хромом, медью, никелем и нефтью. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 12(1): 76–87. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-76-87>
25. Колесников С.И., Ярославцев М.В., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств разных подтипов черноземов юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb (в модельном эксперименте). *Почвоведение*. 2013; 46(2): 195–200. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020081>
26. Колесников С.И., Тлехас З.Р., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении. *Почвоведение*. 2009; (12): 1499–505.
1. Teplaya G.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution (review). *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2013; (1): 182–96. (in Russian)
2. Kushwaha A., Hans N., Kumar S., Rani R. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; (147): 1035–45. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.049>
3. Cheng W., Lei S., Bian Z., Zhao Y., Li Y., Gan Y. Geographic distribution of heavy metals and identification of their sources in soils near large, open-pit coal mines using positive matrix factorization. *J Hazard. Mater.* 2020; 387: 121666. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123147>
4. Chang H.Q., Wang Q.Z., Li Z.J., Jie W.U., Xu X.F., Shi Z.Y. The effects of calcium combined with chitosan amendment on the bioavailability of exogenous Pb in calcareous soil. *J. Integr. Agric.* 2020; 19(5): 1375–86. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(19\)62861-3](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62861-3)
5. Xavier J.C., Costa P.E.S., Hissa D.C., Melo V.M.M., Falcão R.M., Balbino V.Q., et al. Evaluation of the microbial diversity and heavy metal resistance genes of a microbial community on contaminated environment. *Appl. Geochem.* 2019; 105: 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.012>
6. Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., et al. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: a review on heavy metal pollution. *J. Environ. Manage.* 2019; 242: 121–30. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>
7. Silva S., Pinto G., Santos C. Low doses of Pb affected *Lactuca sativa* photosynthetic performance. *Photosynthetica*. 2017; 55(1): 50–7. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0220-z>
8. Francesca F., Maria C.S., Valeria M., Carmen A., Giulia M., Simonetta G., et al. Overall plant responses to Cd and Pb metal stress in maize: Growth pattern, ultrastructure, and photosynthetic activity. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019; 26(2): 1781–90. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3743-y>
9. Huang M.L., Zhou S.L., Sun B., Zhao Q.G. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China. *Sci. Total Environ.* 2008; 405(1–3): 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.004>
10. Sul'dina T.I. The content of heavy metals in food and their effects on the body. *Ratsional'noe pitanie, pishchevye dobavki i biostimulyatory*. 2016; (1): 136–40. (in Russian)
11. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Ecological functions of soils and the effect of contamination with heavy metals. *Pochvovedenie*. 2002; (12): 1509–14. (in Russian)
12. Valkov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Soils of the South of Russia [Pochvy Yuga Rossii]*. Rostov-na-Donu: Everest; 2008. (in Russian)
13. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Atlas of Soils of the South of Russia [Atlas pochv Aзово-Черноморского бассейна]*. Rostov-na-Donu; 2015. (in Russian)
14. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2010.
15. Kloke A. Richtwerte. Orientierungsdaten für tolerierbare einiger Elemente in Kulturböden. *Mitteilungen des VDLUFA*. 1980; 2(1–3): 9.
16. Alekseenko V.A., Suvorinov A.V., Vlasova E.V. *Metals in the Environment. Coastal Water Landscapes of the Black Sea Coast of Russia [Metally v okruzhayushchey srede. Pribrezhnye akval'nye landshafy Chernomorskogo poberezh'ya Rossii]*. Moscow; 2012. (in Russian)
17. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environ. Monit. Assess.* 2019; 191(9): 544. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3>
18. World Soil Resources Reports no. 106. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. IUSS Working Group WRB; 2015.
19. Zvyagintsev D.G., ed. *Soil Microbiology and Biochemistry [Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii]*. Moscow; 1991. (in Russian)
20. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of Biodiagnostics of Terrestrial Ecosystems [Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem]*. Rostov-na-Donu; 2016. (in Russian)
21. Dobrovol'skiy G.V., Nikitin E.D. *Ecology of Soils. The Doctrine of the Ecological Function of Soils [Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv]*. Moscow: Nauka; 2006. (in Russian)

Original article

22. Moshchenko D.I., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I. Comparative assessment of the black soils sustainability in the Central Caucasus and the Caucasus pollution with lead, chromium, copper, nickel and oil. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy*. 2020; 12(1): 76–87. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-1-76-87> (in Russian)
23. Yang X., Yang Y., Wan Y.Y., Wu R.J., Feng D.K., Li K. Source identification and comprehensive apportionment of the accumulation of soil heavy metals by integrating pollution landscapes, pathways, and receptors. *Sci. Total Environ*. 2021; 786: 147436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147436>
24. Ren Z.L., Sivry Y., Dai J., Tharaud M., Cordier L., Zelano I., et al. Exploring Cd, Cu, Pb, and Zn dynamic speciation in mining and smelting-contaminated soils with stable isotopic exchange kinetics. *Appl. Geochem*. 2016; 64: 157–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.007>
25. Kolesnikov S.I., Yaroslavl'tsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. Comparative assessment of the biological tolerance of Chernozems in the South of Russia towards contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment. *Pochvovedenie*. 2013; 46(2): 176–81. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020081> (in Russian)
26. Kolesnikov S.I., Tlekhaz Z.R., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Chemical contamination of Adygea soils and changes in their biological properties. *Pochvovedenie*. 2009; (12): 1499–505. (in Russian)